

导流洞改建为旋流式内消能泄洪洞的研究和实践 ——以公伯峡水电站为例

牛争鸣¹, 洪 镒², 谢小平², 贺立强¹

(1. 西安理工大学水力学研究所, 陕西 西安 710048; 2. 黄河上游水电开发有限责任公司, 青海 西宁 810209)

摘要 概述了国内外旋流式内消能工的研究与进展, 认为该种内消能工是适合于高水头、大流量高坝建设的新型消能工, 是一种适合将施工导流洞改建为泄洪洞的可行方案。以黄河公伯峡水电站为例, 论述了竖井旋流式与水平旋流式内消能工在体型优化中的重点与方向问题, 泄流能力的协调与匹配问题, 通气孔的设计、消能率的构成、空化空蚀、衬砌标准与范围、下游水深的影响等问题。针对旋流式内消能工目前尚无任何设计规范可依据的情况, 认为开展进一步的讨论和研究是有必要的。

关键词 导流洞改建; 旋流式内消能; 公伯峡水电站

中图分类号: TV551.1+2

文献标识码: A

文章编号: 1006-764X(2007)01-0036-06

Research and practice about reconstruction of diversion tunnel into permanent rotary internal energy dissipation tunnel : A case study on Gongboxia Hydropower Station // NIU Zheng-ming¹, HONG Di², XIE Xiao-ping², HE Li-qiang¹ (1. Hydraulic Research Institute, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Upper Yellow River Hydropower Co., Ltd., Xining 810209, China)

Abstract : The research on the rotary internal energy dissipator at home and abroad was summarized. It is considered as a new kind of dissipator suitable for high dams with high water head and large discharge and as a feasible scheme for reconstruction of a diversion tunnel into a discharge channel. With Gongboxia Hydropower Station on the Yellow River taken as an example, some related problems were discussed, including the key points on the shape optimization of horizontal and vertical rotary internal energy dissipator, the adjusting and matching of discharge capacity, vent design, composition of damping ratio, cavitation erosion of connection parts, the standard and region of liner, and the influence of downstream water level. However, the rotary internal energy dissipator needs to be further studied because there lacks a criterion for its design.

Key words : reconstruction of diversion tunnel; rotary internal dissipation; Gongboxia Hydropower Station

1 导流洞改建为旋流式内消能泄洪洞研究的概述

在高山峡谷地区的大江大河上修建电站, 由于受到地形等条件的限制, 往往需要修建数条大尺寸的导流隧洞。导流洞的使用时间只有数年, 属临时性建筑物, 却投资巨大。如何在导流洞完成导流任务后将其改建为永久式泄洪洞一直为世人所关注。另外随着坝高的增加, 泄水建筑物的流速也进一步加大, 这样会带来诸如掺气、脉动、振动、空化空蚀、雾化、下游河床及岸坡的冲刷等特殊的高流速水流问题, 加之这些地区山高谷深, 河道狭窄, 泄洪洞难以布置, 所以以常规方法进行的泄洪洞形体设计、施工、衬砌质量控制等遇到难以克服的困难, 使得高坝

导流洞改建为泄洪洞难于付诸工程实施, 因此需要寻求新的形式来解决当前高坝导流洞改建为泄洪洞的水力设计问题。

从国内外目前的研究进展看^[1-4], 在导流洞改建为永久式泄洪建筑物过程中, 旋流式内消能工具有结构简单、布置灵活、消能率高的特点, 它能适应复杂的地形、地质条件, 利用反转井钻机施工也较简单。它利用旋流的离心力作用, 在壁面上形成正压力, 不易发生空化现象, 而且由于水流的旋转作用, 形成较稳定的空腔, 有利于空气掺混, 减轻了空蚀作用, 同时还因为水流的旋转, 加大了水流流程与紊动, 提高了消能率。导流洞作为永久泄洪洞时, 衬砌工程简化, 降低了工程造价, 加快了施工进度, 并减轻了隧洞出口的冲刷和雾化现象。因此旋流式内消

能工是一种适于深山峡谷中高水头、大流量的新型消能措施,是高坝施工导流洞改建为泄洪洞的可行方案。

关于旋流式内消能工的研究与工程应用在国外开始于 20 世纪 50~60 年代,在国内开始于 90 年代前后,并逐渐成为研究与工程方案论证的热点^[1-2]。国内多家研究机构也先后不同程度地开展了旋流式内消能工的研究。中国水利水电科学研究院、南京水利科学研究院、河海大学和大连理工大学等结合沙牌、小湾等水电站工程,着重开展了竖井旋流式内消能工的研究,国家电力公司西北勘测设计研究院和西安理工大学等结合拉西瓦与公伯峡的导流洞改建着重开展了水平旋流式内消能工的研究,其方法各有特色。

夏维洪^[3-5]在 20 世纪 90 年代初介绍了苏联的旋转水流消能设施,还用模型试验的方法研究竖井进流水平旋转内消能工的环向、纵向流速和断面能量的沿程变化规律,论证了此种消能工消能率高的特性,以及空化数较高、空化特性优良的特点^[3]。崔陇天等^[6]早在 1993 年就对涡流式内消能工的水力特性进行过初探,钱莺莺等^[7]、马萍章等^[8]结合工程方案的论证,也早在 1994 年就研究过同轴反向与单向涡旋内消能工。其后,董兴林等^[9-12]对导流洞改建为旋涡式竖井溢洪道进行了综合研究,并系统地研究了其设计方法和水力学特性,提出超临界流的涡室优化体型,给出确定涡室和竖井等尺寸的经验公式。董兴林等^[13]结合公伯峡水电站导流洞改建水平旋流式泄洪洞试验研究,采用收缩墩形成水垫塘的技术,大大缩短旋流洞的长度,同时增加了消能率。史力生等^[14]研究了混合型竖井泄水道。孙双科等^[15-16]结合小湾水电站导流洞改建为泄洪洞的工程方案,对下游高水位条件下导流洞改建为旋流式竖井泄洪洞后,泄洪洞内出现的水跃、不稳定气囊等不利流态提出竖向压板和多孔平板的工程措施。郭炎和倪汉根^[17-19]通过旋流式竖井溢洪道的模型试验研究和理论分析,推出有锥形渐缩管的竖井溢洪道的流量系数和涡室内环向流速的计算方法。从 1995 年至今,笔者对竖井进流水平旋转内消能泄洪洞的基本水力特性进行了较深入系统的研究^[1-2, 20-29, 33-38]。

在国内,沙牌、拉西瓦、小湾、公伯峡、洪家渡、大梁、吉灵台、冶勒等水电站工程都进行了导流洞改建为旋流式内消能泄洪洞的设计方案比选和试验研究工作,但仅在沙牌水电站和公伯峡水电站得到实际应用。沙牌水电站的竖井旋流式泄洪洞最大泄流量只有 $242 \text{ m}^3/\text{s}$,水头总落差 88.0 m 。公伯峡水电站右

岸泄洪洞是国内第一个泄流量达 $1\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 、水头超过 100 m 、由导流洞改建并已建成的水平旋流式内消能泄洪洞,在我国旋流式内消能泄洪洞设计、研究与工程应用中具有里程碑的意义,将会有力地推动这一新的消能形式在工程上的应用,从而为解决高坝建设中泄水建筑物的高速水流问题与导流洞改建中的技术与经济问题提供工程实例。

2 公伯峡水电站旋流式内消能泄洪洞的试验研究与体型优化

依据《公伯峡水电站调整泄水建筑物布置和规模研究论证报告》的成果^[30],结合导流洞的布置、塌方段的开挖处理形式、工程的实际地形与地质条件、旋流消能的形式及体型要求等因素,有关设计与研究单位先后进行了 4 个基本方案的比较研究工作。

a. 方案 1——竖井旋流式内消能泄洪洞方案^[31]。该方案由压力短进口、引水明涵段、涡室、竖井、水垫塘和退水洞组成。由初步试验,原设计方案存在的主要问题是竖井直径偏小(或进口引渠段的收缩较大),引水渠与竖井顶部壅水,泄流能力不满足设计要求,竖井内水流因竖井高度较小,旋转流速不高而脱离周边直接掉入井底,造成竖井内水流消能不够充分,退水洞流态较乱。针对该方案存在的问题,先后将引水明涵段底板改用圆弧连接,加大竖井的直径,加宽大进水涵管出口宽度,优化竖井底部深度,并在退水洞与竖井的连接段底部加一曲线形堰,以保持竖井内的水垫深度基本不变,优化退水洞进口段的孔口体型,并在退水洞与竖井连接段的孔口内加设两道中墩,改善退水洞内水的流态。进行这样一系列修改与体型优化后,就形成竖井旋流式内消能泄洪洞的推荐方案。

b. 方案 2——水平旋流式内消能泄洪洞方案^[31]。该方案由堰流进水口、竖井、起旋器、旋流洞、水垫塘和退水洞组成。通过试验发现原设计方案存在的主要问题是局部地方可能会发生空化。为了保证运行安全可靠,避免发生空蚀,先后采取在竖井进口曲面增设通气挑坎与通气槽;在旋流洞下游设三角墩,缩小旋流洞末端面积,构成水垫塘消能工等措施对体型进行优化。以上修改较好地解决了水平旋流式内消能泄洪洞原设计方案存在的局部地方可能会发生空化的问题,形成水平旋流式内消能泄洪洞推荐方案。

c. 方案 3——淹没流水平旋流式内消能泄洪洞方案^[32]。该方案是在方案 2 的基础上由原设计部门优化设计后提出的。经试验,原设计方案存在的水力学问题为溢流堰水舌与竖井水面出现水跃街

接,竖井内水位壅浪较大,模型井壁振动明显;旋流洞和水垫塘长度偏短,消能不充分;起旋器与旋流洞连接处局部处于低压区。针对这些问题,先后采用降低溢流堰顶高程、加设门楣和调整闸门尺寸,加大上部过堰流量,使竖井内水位充分壅高接近库水位;优化起旋器体型;优化水垫塘体型;增大通气孔直径,降低通气孔风速,提高旋流洞旋转水流的掺气量等一系列工程措施对原设计体型进行优化。按上面所述进行体型修改与优化后的方案即为淹没流推荐方案。

d. 方案4——自由流水平旋流式内消能泄洪洞方案^[32]。该方案亦是在方案2的基础上由原设计部门优化设计后提出的。为了避免堰上出现大波动和旋流洞进口发生空蚀现象,按自由堰流方案设计,并在溢流面上设通气槽。经试验,原设计方案存在的水力学问题为进口溢流堰和退水洞内波动较大,在设计工况竖井后壁出现负压空腔,在校核工况通气槽进水,以及旋流洞通气量较大。针对这些问题,先后采用在溢流堰两边墩上设竖向掺气坎,代替通气槽,减小水垫塘收缩断面,设消旋墩;减小旋流洞通气孔直径;取消水垫塘内消旋墩与优化收缩墩结构;采取通气管掺气减蚀措施;采用增压折流坎消除起旋洞连接段的负压的措施对原设计体型进行了修改与优化,形成自由流推荐方案。

3 公伯峡水电站旋流式内消能泄洪洞方案的选择与主要依据

3.1 各方案的主要优缺点

方案1的主要问题是压力短进口、引水渠、涡室与竖井内的流态变化较复杂,协调与匹配较困难;竖井内水流因竖井高度较小、旋转流速不高造成竖井内水流消能不够充分,竖井振动较大,堰面有空蚀的可能。方案2的主要问题是起旋器出口有发生空化的可能,通气量较大;自由堰流时堰面有空蚀的可能。在竖井进口曲面增设通气槽,优化起旋器体型和在旋流洞下游设三角墩,构成水垫塘可较好地解决这些问题^[32]。

方案3与方案4都是水平旋流式内消能泄洪洞推荐方案优化后的比选方案。最主要的差别体现在淹没出流型竖井进水口淹没,尽量保持竖井内水面稳定,提高竖井内的压力,流量由竖井末端与水平旋流洞连接部位的起旋器扁口处的面积来控制;自由出流型竖井进水口为自由堰流,竖井内水流充分掺气,流量主要由堰闸段工作闸门孔口尺寸来控制。淹没流推荐方案加大了竖井进水口尺寸,增加了堰闸段工程量和金属结构量,但竖井内水流稳定,减小

了水流脉动,起旋器体型较简单,有利于简化结构和运行安全。自由出流型泄流能力由竖井进水口控制,堰后边墩设掺气坎,加大起旋器断面,形成双向渐变,并在水平旋流段前设折流坎,体型较复杂。虽然竖井内大量掺气,有利于防止空蚀破坏,但井内水流不稳定,压力波动大,况且体型复杂,恶化了结构受力状态,不利于运行安全。对下游水平洞段,两方案无本质差别,均采用了水流大量掺气、旋转消能、水垫塘突扩消能和调整水流流态的方法,结构与水力特性差别不大。两个方案在水垫塘进出口均存在负压区,退水洞始端均存在一定长度的水流封顶现象,通气设施在水平洞内掺气均十分充分,但淹没出流型通气孔孔内风速较大,需要加大通气孔面积,控制通气孔内风速。两个方案各部位按常规水工模型试验计算所得的最小水流空化数均大于规范建议的 $[k]=0.3$ 的临界值,加之掺气充分,经分析发生空蚀破坏的可能性不大。两个方案解决起旋器与旋流洞连接部位空化问题的思路是不同的。自由流推荐方案利用竖井大量掺气来达到对起旋器与旋流洞连接部位的掺气减蚀作用,并设置了贴坡弧形折流坎和小升坎,消除了空化敏感部位的负压,提高了该部位的掺气浓度。淹没流推荐方案通过起旋器体型的优化亦消除了连接部位的负压,通过旋转水流的剪切作用,将旋流空腔内的空气补给建筑物近壁,使常规水工模型试验时的近壁掺气浓度达到了12%以上,水流空化数 k 达到了0.5左右,起到了掺气减蚀的作用^[32]。

3.2 选型结果与主要理由

通过水力特性、体型结构、工程量与经济等方面的对比分析,并考虑了各方案对地形地质条件的适应性、施工条件、运行条件、检修条件、闸门开启过程和进口堰闸段水力条件等因素后,原设计部门选定公伯峡水电站右岸旋流式内消能泄洪洞的最终应用方案为方案3,即淹没流推荐方案,其基本体型见图1^[32](图中 D , R 分别表示相应洞径、管径和曲面的直径与半径)。

选型的主要理由为:

a. 方案3将竖井仅仅作作为过流通道,改善了竖井的水流稳定条件,更能适应于恶劣的地质条件,避免了把竖井兼作为掺气设施和消能设施而引起的水流流态恶化问题。

b. 方案3起旋器及其与旋流洞连接断面处的体型简单,对空化敏感部位可按试验研究确定的方法来解决。从抗空蚀破坏的措施来讲,还可以采用提高不平整度控制标准和选择抗空蚀性能较好的材料来作为空蚀的安全裕度。

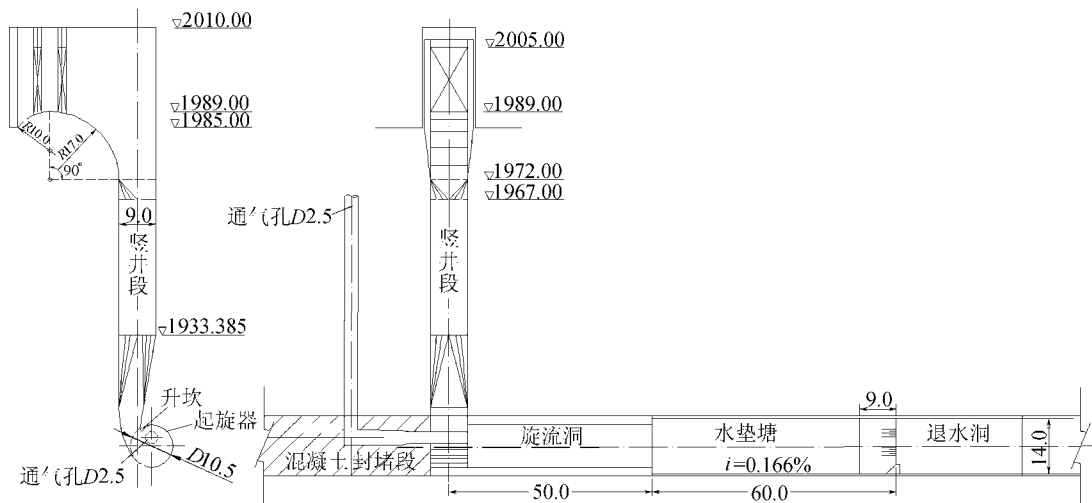


图 1 方案 3 基本体型(单位:m)

c. 方案 3 将通气孔与竖井分开布置, 施工相互干扰小, 各自受力条件均比较明确, 简化了竖井井壁的结构受力条件, 提高了竖井开挖期的井壁安全稳定条件及简化施工支护措施。

d. 方案 3 在提高竖井安全的同时, 将主要矛盾集中在泄洪洞下平洞段, 即使下平洞段出现问题, 对整个泄洪洞的安全危害性比在竖井部位破坏的危害性要小一些, 且检修条件好。

e. 虽然方案 3 的工程量与投资相对较大,但其安全性把握更大一些。

4 旋流式内消能泄洪洞研究的有关问题与最新成果

4.1 旋流式内消能泄洪洞研究的有关问题

a. 在体型优化的重点上,竖井旋流式与水平旋流式泄洪洞是不同的。竖井旋流式泄洪洞首先要解决的是在一定的设计流量下,压力短进口、引水道、涡室和竖井与退水道连接部位泄流能力、流态的协调与匹配问题。否则难以适应较大的起始流速的变化,导致涡室壅水,泄流量减小,起旋强度不够,竖井内旋转消能不充分或水流折冲引起涡室与竖井内旋转水流流态不佳。其次要解决竖井末端水垫深度和退水道连接部位的流态衔接问题。水平旋流式泄洪洞首先要解决的问题也是在一定的设计流量下竖井进口和起旋器出口泄流能力的协调与匹配问题。淹没出流可保持竖井内水面稳定,提高竖井内的压力,流量由竖井末端与水平旋流洞连接部位的起旋器收缩断面的面积来控制,水平洞内的旋流流态单一。单一流态有利于设计,运行也更安全可靠。其次竖井末端与水平旋流洞连接部位起旋器体型的优化是关键问题。只要起旋器的体型理想,就可形成流态单一、体型简单、壁面压强变化均匀,起旋器出口旋

流强度较大、空腔环流稳定、通气孔通气条件稳定、消能率高的水力条件。但起旋器出口后的空化空蚀问题是体型优化的难点。

b. 对于在竖井内整体掺气或通过通气孔的通气, 利用旋转水流的离心力作用使气泡向周壁扩散, 达到起旋器与旋流洞连接部位的掺气减蚀的观点, 值得商榷。这是因为在高速水流急剧转向、能动力剧变的近壁强剪切层内, 气泡的质量较小但体积较大, 大尺度旋涡近壁混掺的可能性是值得怀疑的。解决起旋器出口与旋流洞连接部位后的空化空蚀问题应从优化起旋器的体型、在起旋器出口后的易空化部位局部通气及采用较强的抗空化材料几个方面入手^[20]。

c. 对于水平旋流,通气孔的尺寸对流动的稳定性、流态变化和许多水力特性有密切的关系,通气孔的合理设置是非常重要的,过去的认识是不足的。因旋流条件下,空腔环流内的负压形成的压差或轴向流动携带所致的通风量的计算尚无根据可依,参照常规的如冯家山、石头河等工程原型观测中的实测风速论证旋流泄洪洞通气孔设置的合理性是不可靠的。因此在水头较高、泄流量较大、风速远大于工程中一般采用的 $[v] \leq 60 \text{ m/s}$ 的风速限制要求时,模型试验与原型验证是非常必要的。

d. 水平旋流式内消能泄洪洞的水流能量损失主要集中在竖井与水平洞的连接部位的旋流洞段和水平洞的前段,竖井旋流式主要集中在竖井水垫塘内和退水洞的连接段,导流洞在改建过程中,旋流洞的范围和衬砌标准应以此为依据制定,但空腔环流的能量转化与消耗机理、规律需要进一步的研究^[24,26]。

e. 在竖井进口为自由堰流时,竖井进口后溢流面的空化空蚀问题也值得关注。为避免堰面空化而

增设通气槽的工程措施值得进一步探讨。这是因为通气孔的运行状态因闸门的开度变化而多变,并会导致水平旋流洞内的流态发生变化^[35]。

f. 在下游水深有可能淹没洞出口且有较大变化时,有可能发生通气孔的通气量、空腔环流内压强、泄流量等水力特性等的突变,设计时应考虑这一点^[29 33]。

4.2 水平旋流式内消能泄洪洞研究的最新成果

a. 通气孔的孔径越小,环流空腔内的负压越大,壁面压强越大,特别是起旋器出口段的压强降越小,这与通常的认识是相反的^[33 36-37]。

b. 起旋器出口后,空腔环流的能动力转变规律与流态有关。吸吮流流态时(即环流空腔内为负压时),起旋器的出口段切向的动量增大,轴向的动量减小,壁面压强沿轴向的降低减缓^[26 37]。

c. 不同流态下通风孔通气的通风机理是不同的,在吸吮流流态时,通气孔通气量与泄流量的比值与相对真空度的 $1/2$ 次方成正比,在自由流流态时,与轴向的断面平均流速成正比^[14 38]。

d. 空腔环流内的气体压强是水平旋转内消能洞重要的水动力学的边界条件之一。空腔环流内的负压值随通气孔相对直径增大呈指数减小变化,但在通气孔相对直径不变时,沿程却有较好的保持性^[33 36]。

e. 通气孔较小时,在一定的上、下游水位范围内,泄流量、通气孔的通风量、空腔环流内的负压值之间具有负反馈性质的相互作用^[37]。

f. 在吸吮流流态时,空腔环流内的气体压强增量和离心力压强增量符号相反,因此与淹没流流态和自由流流态相比,在吸吮流流态时壁面压强的变化最小。

g. 水平旋流式内消能泄洪洞的壁面切应力在水平洞的起始段急剧减小,与能量的损失和旋流强度密切相关。

h. 在水平旋流洞内设置洞塞后,洞塞前壁面压强增大并且沿程变化减小,洞塞后呈较完全的气水两相流,这对改善水平旋流式内消能泄洪洞的水力特性是有利的^[34]。

5 结 语

旋流式内消能工是高坝施工导流洞改建为泄洪洞的可行方案的观点已被大多数设计与研究者所接受,但由于旋流式内消能泄洪洞为新型泄水建筑物,在设计、研究与应用方面都处在尝试阶段,经验不足,几乎没有可依据的设计规范和借鉴的实际工程,因此在设计、研究中,安全可靠应作为第一考虑的因

素,流态单一、体型简单、压力均匀变化、抗空化性能好和易于检查与维修的体型才是实际工程可接受的体型。公伯峡水电站将导流洞改建成永久旋流式内消能泄洪洞,表明在我国,在较高水头较大流量的水电站将导流洞改建为永久旋流式内消能泄洪洞已进入实际应用阶段,但应加强旋流式内消能工的理论与应用基础性方面的研究和设计规范的制定,以利于推广应用。

参考文献:

- [1] 牛争鸣,谢小平,洪锺,等.旋流内消能泄洪洞的国内外研究进展与发展趋势[C]//刘树坤.全国基础水力学学术研讨会论文集.武汉:武汉大学出版社,2004:72-77.
- [2] 牛争鸣.竖井进流水平旋转内消能泄洪洞水动力学特性的研究与数值模拟[D].西安:西安交通大学,2006.
- [3] 夏维洪.苏联的旋转水流消能[J].水利水电科技进展(河海科技进展),1991,11(3):29-40.
- [4] 董兴林,高季章.利用导流洞改为竖井式永久泄洪洞研究综述[J].水力发电,1993(8):47-50.
- [5] 夏维洪,王河生.旋转水流消能及空化特性[J].河海大学学报,1998,26(3):11-17.
- [6] 崔陇天,吕瑞平.涡流式消能工水力特性初探[C]//全国水动力学研讨会文集.上海:水动力学研究与进展编辑部,1993:538-547.
- [7] 钱莺莺,马萍章.同轴反向涡旋内消能工的试验研究[C]//泄水工程与高速水流论文集.成都:成都科技大学出版社,1994:71-76.
- [8] 马萍章,钱莺莺.单向涡旋内消能工的试验研究[C]//泄水工程与高速水流论文集.成都:成都科技大学出版社,1994:77-83.
- [9] 董兴林,高季章,鲁慎吾,等.导流洞改为旋涡式竖井溢洪道综合研究[J].水力发电,1995(3):32-37.
- [10] 董兴林,郭军,杨开林,等.旋流泄洪洞的特点及其运行可靠性分析[J].水力发电,2003(4):33-35.
- [11] 董兴林,高季章,钟永江.超临界流旋涡竖井式溢洪道设计研究[J].水力发电,1996(1):42-47.
- [12] 董兴林,郭军,肖白云,等.高水头大泄量旋涡竖井式泄洪洞的设计研究[J].水利学报,2000(11):27-33.
- [13] 董兴林,余闽敏,吴曾谋,等.导流洞改建旋涡流式泄洪洞研究与应用[J].水力发电,2003(4):27-29.
- [14] 史力生,董兴林.混合型竖井泄水道研究[J].水利学报,1993(5):34-38.
- [15] 孙双科,刘之平,周胜.下游高水位条件下导流洞改建为旋流竖井式泄洪洞的水力学问题研究[J].水利学报,2000(10):22-27.
- [16] 孙双科,刘之平,周胜.小湾水电站大型导流洞改建泄洪洞研究[J].水力发电,2001(4):53-58.
- [17] 倪汉根,郭琰.旋流式竖井溢洪道的流量系数[C]//泄水工程与高速水流论文集.成都:成都科技大学出版

社,1994:342-345.

[18] 郭琰,倪汉根.旋流式竖井溢洪道的过流能力及蜗室与锥形渐缩段的水力特性研究[J].水动力学研究与进展,1995,10(1):97-105.

[19] 郭琰,倪汉根.旋流式竖井溢洪道竖井的水流特性研究[J].水动力学研究与进展:A辑,1995,10(2):146-154.

[20] 牛争鸣,李建中,陈运生,等.竖井进流水平旋转内消能泄水道的空化特征[J].水利学报,1998(增刊):44-49.

[21] 牛争鸣,孙静,章晋雄.竖井进流水平旋转内消能泄水道的泄流特性研究[J].水利学报,2002(1):61-69.

[22] 牛争鸣,孙静,张鸣远.竖井进流水平旋转内消能泄水道壁面压力分布规律[J].水力发电学报,2002(4):71-80.

[23] 牛争鸣,孙静,张鸣远.竖井进流水平旋转内消能泄水道空腔直径的变化规律[J].水利学报,2003(1):31-37.

[24] 牛争鸣,孙静,程庆迎.竖井进流水平旋转内消能泄水道流速分布与消能率的试验研究[J].水力发电学报,2003(1):61-69.

[25] 孙静,牛争鸣,章晋雄.竖井进流水平旋转内消能泄水道流速分布的试验研究[J].水动力学研究与进展:A辑,2003,18(2):240-247.

[26] 牛争鸣,张鸣远.水平旋转内消能泄水道空腔环流的能量特性[J].西安交通大学学报,2004,38(7):741-745.

[27] 牛争鸣,张鸣远.水平旋转内消能泄水道空腔环流的旋流特性[J].水力发电学报,2004(3):102-106.

[28] 牛争鸣,张鸣远.水平旋转空腔环流的壁面应力[J].应用力学学报,2004,21(4):110-114.

[29] 牛争鸣,贺立强,汪振.下水水位对水平旋转内消能泄水道水力特性的影响[J].水利学报,2005,36(10):1213-1218.

[30] 周恒,陈念水.公伯峡水电站调整泄水建筑物布置和规模研究论证报告[R].西安:国家电力公司西北勘测设计研究院,2001.

[31] 周恒,陈念水.黄河公伯峡水电站利用导流洞改建为旋流消能泄洪洞专题研究报告[R].西安:国家电力公司西北勘测设计研究院,2002.

[32] 洪摘.“公伯峡水电站导流洞改建为竖井旋流式内消能泄洪洞”问题的研究[D].西安:西安理工大学,2003.

[33] 曹双利.旋流条件下通气孔的通气量与环流空腔内的气体压强的变化规律[D].西安:西安理工大学,2005.

[34] 安丰勇.水平旋流内消能泄洪洞的阻塞效应研究[D].西安:西安理工大学,2005.

[35] 贺立强.公伯峡水平旋流式泄洪洞试验研究与运行方式优化[D].西安:西安理工大学,2006.

[36] 牛争鸣,孙静,洪摘,等.水平旋转内消能泄洪洞内气体压强的变化规律[J].水动力学研究与进展:A辑,2006,21(4):526-532.

[37] 牛争鸣,张宗孝,洪摘,等.通气对水平旋转内消能泄洪洞水力特性的影响[J].长江科学院院报,2006,23(5):1-5.

[38] 牛争鸣,张鸣远.水平旋转内消能泄水道的流态序列、分区特性及临界条件[J].水动力学研究与进展:A辑,2005,20(1):14-18.

(收稿日期 2006-01-26 编辑 熊水斌)

(上接第 23 页)

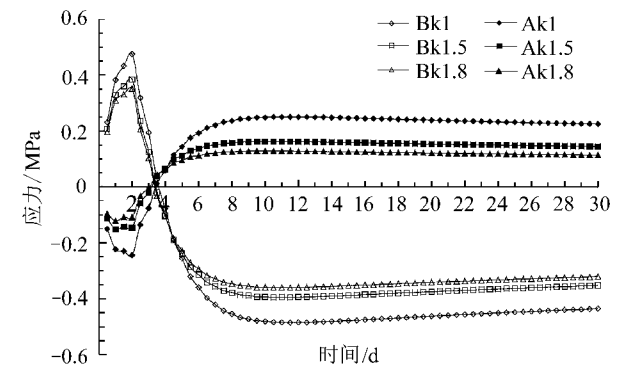


图 7 SFRC 温度应力过程线

3 结 论

通过计算分析,得出了钢纤维混凝土在早期水化热及外界温度影响下的温度及应变规律:

a. 数值计算的规律与试验所得到的规律完全一致。从应力最大值来看,SFRC 只有 OPC 的一半,SFRC 的抗变形能力要强于 OPC。

b. 从本例来看 SFRC 内的温差及其应力差与 SFRC 的导热性能接近线性反比关系。热导率变大,

温差就变小,应力随之变小。

c. 钢纤维混凝土抗裂性能的提高,既有力学方面的因素也有热力学方面的因素。应在实际应用中把握这一特性。

d. 下一步笔者准备对 SFRC 在钢纤维不同掺率下的导热性能进行试验研究,以明确热导率与钢纤维掺率的实际关系。

参考文献:

[1] 程庆国,高路彬,徐蕴贤,等.钢纤维混凝土理论及应用[M].北京:中国铁道出版社,1999:50-63.

[2] 邵宝东,程赫明,文宏光.钢纤维混凝土路面结构温度应力的有限元分析[J].河南科技,2002,20(6):688-692.

[3] 倪铁权,王雪亮,李海波.层布式钢纤维混凝土路面温度应力分析[J].国外建材科技,2005,26(1):33-35.

[4] 朱伯芳.大体积混凝土温度应力与温度控制[M].北京:中国电力出版社,1999:15-17.

[5] 罗棣庵.传热应用与分析[M].北京:清华大学出版社,1989.

(收稿日期 2005-09-22 编辑 马敏峰)